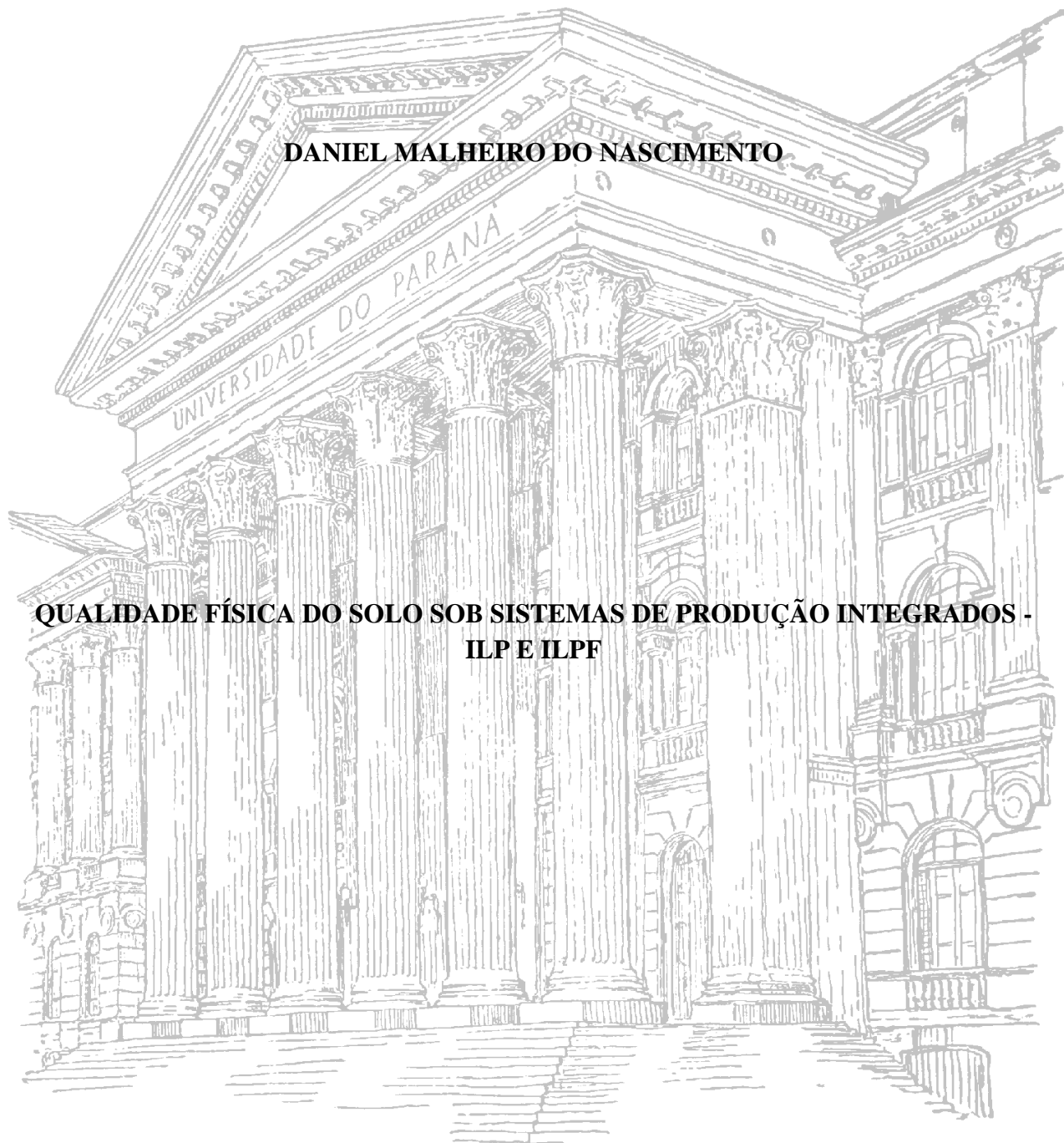


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

DANIEL MALHEIRO DO NASCIMENTO

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS -
ILP E ILPF**



CURITIBA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

DANIEL MALHEIRO DO NASCIMENTO

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS -
ILP E ILPF**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração **Qualidade e Conservação do solo e da água**, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: **Prof^a Dr^a Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli**

CURITIBA

2017

N244 Nascimento, Daniel Malheiro do
Qualidade física do solo sob sistemas de produção integrados -
ILP e ILPF / Daniel Malheiro do Nascimento. Curitiba: 2017.
46 f.; il.

Orientadora: Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

1. Solos - Estrutura. 2. Solos - Qualidade. 3. Lavoura –
Pecuária - Integração. I. Polizeli, Karina Maria Vieira Cavalieri.
II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias.
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CDU 631.434



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **Daniel Malheiro do Nascimento**, intitulada: **"Qualidade física do solo sob sistemas de produção integrados – ILP e ILPF"**, do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela **"APROVAÇÃO"** da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 16 de fevereiro de 2017.


Prof. Dr. Jefferson Dieckow, Presidente


Prof. Dr. Osvaldo Guedes Filho, Iº. Examinador


Prof. Dra. Nerilde Favaretto, IIº Examinador

Aos meus pais, Luis Quirino e Marilene Malheiro do Nascimento, e meus irmãos,
Luis Quirino Jr e Cristiano Malheiro do Nascimento.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao criador, que permite que eu sempre faça o meu melhor!

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar este trabalho e a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Karina M. V. Cavalieri Polizeli, por acreditar em mim, me incentivar e ensinar durante o período em que trabalhamos juntos.

Aos professores: Prof^ª. Dr^ª. Anastácia Fontanétti, Prof^ª. Dr^ª. Beatriz Serrat, Prof^ª. Dr^ª. Fabiane Vezzani, Prof. Dr. Marcelo de Lima, Prof. Dr. Milton Moraes, Prof^ª. Dr^ª. Nerilde Favaretto e Prof. Dr. Vander Melo, pelo empenho e dedicação com que passaram seus conhecimentos.

Aos colegas da pós-graduação: Bruno Vizioli, Cibelle Oliveira, Leiken Weber, Marcus Cremonesi e Wilson Teixeira.

Aos colaboradores do projeto ServAmb: Pesquisadora Dr^ª. Lucília, Prof^ª. Dr^ª. Nerilde e Dr^ª. Alcione.

Aos amigos e companheiros de tatame, alguns presentes na minha caminhada desde criança.

Aos meus pais Luis e Marilene e irmãos Luis Jr e Cristiano que me incentivam e apoiam, permitindo que eu trilhe meu próprio caminho.

“É graça divina começar bem. Graça maior persistir na caminhada certa. Mas graça das graças é não desistir nunca!”.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
TÍTULO	1
1. Introdução	1
1.1. Sistemas de produção integrados.....	1
1.2. Indicadores de qualidade física do solo.....	2
2. Material e Métodos.....	5
2.1. Área experimental.....	5
2.2. Amostragem e análises do solo.....	7
2.3. Densidade do solo máxima ($D_{s_{máx}}$), e densidade relativa do solo (DR).....	8
2.4. Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) e capacidade de aeração (CA)..	9
2.5. Capacidade de campo relativa (CCR).....	9
2.6. Índice de estabilidade estrutural (IEE).....	10
2.7. Água disponível (AD).....	10
2.8. Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	10
2.9 Índice S.....	12
2.10. Análises estatísticas.....	12
3. Resultados e Discussão.....	13
4. Conclusões.....	24
5. Literatura Citada	24
CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
APÊNDICES	33

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS - ILP E ILPF

Autor: Daniel Malheiro do Nascimento

Orientadora: **Prof^a Dr^a Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli**

RESUMO

A degradação das pastagens culmina com a ruptura dos recursos naturais. A recuperação das pastagens e a melhoria das características físicas do solo são conseguidas através da inversão deste processo de degradação, como ocorre com a Integração Lavoura-Pecuária (ILP). O objetivo deste trabalho foi analisar a qualidade física do solo submetido à Integração Lavoura-Pecuária (ILP) e à Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). O estudo foi realizado na Fazenda Modelo-IAPAR, unidade de Ponta Grossa-PR. Os solos encontrados na área de ILP são o Latossolo Vermelho e o Cambissolo Háplico e na área de ILPF o Latossolo Vermelho, ambos de textura areia franca. Foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e indeformada, para a determinação dos seguintes atributos físicos do solo: textura, densidade de partículas (D_p), densidade do solo (D_s), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}), capacidade de aeração (CA), porosidade total (α), resistência à penetração radicular (RP) e carbono orgânico total (COT). Foram determinadas também as curvas de retenção de água (CRAS) e de resistência do solo à penetração de raízes (CRP). Os indicadores de qualidade física do solo (IQFS) obtidos foram: densidade relativa do solo (DR), índice de estabilidade estrutural (IEE), índice S, capacidade de campo relativa (CCR), água disponível (AD) e o intervalo hídrico ótimo (IHO). Os IQFS foram capazes de distinguir os sistemas integrados de produção, sendo o ILPF o sistema que obteve maior impacto negativo sobre os atributos físicos do solo. Não foram constatadas as densidades críticas (D_{sc}) em ambos os sistemas, apesar do ILPF ter apresentado valores de D_s bem próximos do $IHO=0$. A qualidade física do solo ficou dentro dos intervalos considerados adequados, na maioria dos indicadores utilizados, para os sistemas integrados ILP e ILPF. Contudo, verificou-se que o componente arbóreo afetou negativamente a qualidade física do solo em comparação ao ILP, principalmente na camada de 0,05-0,10 m.

Palavras-chave: Sistemas integrados; estrutura do solo; água disponível; intervalo hídrico ótimo.

SOIL PHYSICAL QUALITY UNDER INTEGRATED PRODUCTION SYSTEMS - ICL AND ICLF¹

Author: Daniel Malheiro do Nascimento

Advisor: **Prof^a Dr^a Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli**

ABSTRACT

The degradation of the pastures culminates with the rupture of the natural resources. The pastures recovery and the soil physical characteristics improvement are achieved through the inversion of this degradation process, as it happens with the Integrated Crop-Livestock (ICL). The aim of this work was to analyze soil physical quality submitted to Integrated Crop-Livestock (ICL) and Integrated Crop-Livestock Forestry (ICLF). The study was carried out at Fazenda Modelo-IAPAR, Ponta Grossa-PR unit. The soils found in the ICL area are the Red Latosol and the Haplic Cambisol, and in the ICLF area is the the Red Latosol, both of them with loamy sand texture. Soil samples with deformed and undeformed structure were collected to determine the following soil physical attributes: texture, soil particle density (PD), soil bulk density (BD), volumetric moisture in field capacity (θ_{FC}), air capacity (AC), total porosity (α), resistance to root penetration (RP) e organic carbon contend (OCC). Water retention curves (WRC) and soil resistance to root penetration (SRP) have also been determined. The soil physical quality indicators (SPQI) obtained were: soil relative density (RD), structural stability index (SSI), S index, relative field capacity (RFC), plant-available water capacity (PAWC), and least limiting water range (LLWR). SPQI were able to distinguish integrated production systems, ICLF was the system that had the greatest negative impact on soil physical attributes. The critical densities (D_c) in both systems were not found, although the ICLF showed values of BD very close to the $LLWR=0$. The soil physical quality was within the ranges considered adequate, in most of the indicators used, for the integrated systems ICL and ICLF. However, it was verified that the tree component adversely affected the soil physical quality in comparison to the ICL, mainly in the 0.05-0.10 m layer.

Key words: Integrated systems; soil structure; plant-available water capacity; least limiting water range.

¹ Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (38 p.) February, 2017.

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS - ILP E ILPF

1. INTRODUÇÃO

1.1. SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS

As pastagens constituem a base da produção de ruminantes no país, no entanto, a degradação dessas áreas, em várias regiões brasileiras, tem diminuído a produtividade, comprometendo a sustentabilidade e a rentabilidade das mesmas (Oliveira et al., 2013; Freitas et al., 2016), sendo a atividade de pastejo extensiva da pecuária brasileira a principal causa de sua degradação (Lanzanova et al., 2007; Flavio Neto et al., 2015). Degradação das pastagens é definida como um processo evolutivo da perda do vigor, de produtividade, da capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e a qualidade exigida pelos animais, bem como o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, culminando com a degradação avançada dos recursos naturais (Macedo e Zimmer, 1993).

Os solos ocupados por pastagens em geral são marginais quando comparados àqueles usados pela agricultura de grãos, estes usualmente apresentam problemas de fertilidade natural, acidez, topografia, pedregosidade ou limitações de drenagem (Adamoli et al., 1986; Macedo et al., 2013). A recuperação das pastagens e a melhoria das características físicas do solo são conseguidas através da inversão deste processo de degradação, como ocorre com a Integração Lavoura-Pecuária (ILP) (Costa et al., 2010; Flavio Neto et al., 2015).

Sistemas integrados de produção devem ser capazes de, ao mesmo tempo, aumentar a quantidade de produtos agrícolas de boa qualidade e conservar os recursos ambientais. Dentro desses sistemas estão inseridos o ILP ou sistema agropastoril: integra os componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos; e ILPF ou sistema agrossilvipastoril que além dos componentes agrícola e pecuário, integra também o componente florestal (Balbino et al., 2011).

A integração lavoura-pecuária pode proporcionar algumas vantagens para o produtor, tais como maior renda por área, maior diversificação de atividades, menor risco econômico e menor custo de produção. Além disso, pode proporcionar melhoria da qualidade do solo. Dentre as desvantagens, pode-se relacionar a possibilidade de ocorrência de compactação superficial do solo, em situação de manejo inadequado da pastagem (Balbinot Jr et al., 2009).

Balbino et al. (2011) afirmam que, com a utilização de sistemas integrados nas diferentes modalidades existentes de ILPF (silvipastoril, silviagrícola, agropastoril e agrossilvipastoril), com diferentes solos (texturas, fertilidade, estrutura, outros), mereciam especial atenção, especificamente sobre: física dos solos (densidade, compactação, resistência à penetração, estabilidade de agregados, porosidade, dinâmica e retenção hídrica, etc.); atividade biológica (macro, meso e microbiologia); e fertilidade do solo e reciclagem de nutrientes.

1.2. INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

O conceito de qualidade física do solo está estabelecido juntamente com a existência de parâmetros do solo “indicadores” que quantificam o nível ou grau de qualidade (ideais, ótimos ou intervalos preferidos) (Arshad e Martin, 2002; Reynolds et al., 2007, 2009). Segundo os autores, os indicadores de qualidade do solo referem-se a atributos mensuráveis de solo que influenciam a capacidade do solo em desempenhar a produção agrícola ou funções ambientais, sendo os atributos mais desejáveis como indicadores aqueles que são mais sensíveis ao manejo do solo.

Em solos agrícolas pouco a moderadamente expansivos alguns dos mais importantes indicadores de qualidade física incluem a densidade do solo (Ds), o carbono orgânico total (COT), a capacidade de aeração (CA), a capacidade de campo relativa (CCR), o índice de estabilidade estrutural (IEE) e a água disponível às plantas (AD), pois eles quantificam (direta ou indiretamente) a capacidade do solo em armazenar e fornecer água, ar e nutrientes às plantas cultivadas (Reynolds et al., 2007, 2009).

A Ds é um atributo usado com frequência como um indicador indireto da aeração, compactação, e capacidade do solo em estocar e transmitir água. Reichert et al. (2003) e Reinert et al. (2008) propuseram alguns valores de densidade do solo crítica (Dsc) para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,60 Mg m⁻³ para os franco-argilosos e de 1,60 a 1,80 Mg m⁻³ para os franco-arenosos. Reynolds et al. (2007); Tormena et al. (2008) citam também que em solos com textura fina e média, a Ds considerada adequada para a máxima produção das culturas estaria entre 0,90 a 1,20 Mg m⁻³, valores abaixo de 0,90 Mg m⁻³, causariam perdas de produção devido à inadequada ancoragem da planta, baixa capacidade de disponibilizar água à planta, e redução do fluxo insaturado de água e nutrientes dissolvidos para as raízes das plantas (Reynolds et al., 2008).

A densidade relativa do solo ou grau de compactação (DR) pode ser estimada através de uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima ($D_{s_{\text{máx}}}$), a partir dos teores de argila e matéria orgânica (M.O.) no solo (Marcolin e Klein, 2011). Segundo os autores, estudos têm sido realizados visando-se determinar a DR ótima, ou limitante, ao pleno desenvolvimento e máximo rendimento das culturas. Os solos agrícolas apresentam grande amplitude de densidade em função de suas características mineralógicas, de textura e de teor de M.O., apresentando uma amplitude de 0,90 até 1,80 Mg m^{-3} (Klein, 2014). Segundo o autor, solos com a mesma composição e textura podem apresentar também grande amplitude, dependendo do manejo a que são submetidos.

A CCR indica a capacidade do solo de fornecer água e ar em função de sua porosidade total. Para a agricultura de sequeiro em solos minerais, o balanço ideal na zona de raiz, considerando a disponibilidade de água e ar ocorre quando $0,60 \leq \text{CCR} \leq 0,70$, a produção microbiana de nitrato nessa faixa é maximizada, que é normalmente um dos nutrientes limitantes ao desenvolvimento da cultura e produção (Doran et al., 1990; Reynolds et al., 2007, 2009). De acordo com os autores, baixos valores de CCR ($\leq 0,60$) resultam em menor produção microbiana de nitrato devido à insuficiência de água no solo, e valores de CCR ($> 0,70$) causam redução na produção de nitrato devido à insuficiência de ar no solo.

O IEE é baseado no carbono orgânico e textura, o que não é relacionado diretamente com os aspectos de porosidade e estrutura do solo, mas sim com a “resiliência” da estrutura. (Reynolds et al., 2007, 2009). O IEE tem sido usado para avaliar o risco de degradação estrutural em solos cultivados (Pieri, 1992). Segundo o autor, um $\text{IEE} > 9 \%$ indica estrutura estável, $7 \% < \text{IEE} \leq 9 \%$ indica baixo risco de degradação estrutural, $5 \% < \text{IEE} \leq 7 \%$ indica alto risco de degradação, e $\text{IEE} \leq 5 \%$ indica solos com estrutura degradada.

Em relação à retenção de água, o solo constitui um reservatório ao qual se repõe, periodicamente, a água retirada pela cultura e evaporação, respeitando-se um intervalo para a disponibilidade de água. O conceito de água disponível (AD), umidade do solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), é amplamente utilizado nos estudos de qualidade física do solo (Tormena et al., 1999; Reynolds et al., 2007, 2009). A obtenção da CC e do PMP pode ser através da curva de retenção de água no solo, que também é utilizada para a determinação de outros indicadores de qualidade física do solo. Tem-se que a $\text{AD} \geq 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é considerada “ideal” para o máximo crescimento e desenvolvimento das raízes (Cockroft e Olsson, 1997; Reynolds et al., 2007, 2009), sendo $0,15 \leq \text{AD} \leq 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

considerada “boa”, $0,10 \leq AD \leq 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ considerada “limitante”, e $AD \leq 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ considerada condição “seca” (White, 2006; Reynolds et al., 2007, 2009).

O índice S, proposto por Dexter (2004) é definido como o ângulo da tangente no ponto de inflexão da curva de retenção da água do solo (CRA) e representa a distribuição do tamanho de poros de maior frequência que controlam a transmissão e o armazenamento de água no solo, assim como a aeração e o crescimento radicular, e torna possível a comparação direta de diferentes solos e dos efeitos de diferentes práticas de manejo na qualidade física do solo. Segundo o autor, o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural ocorre no valor aproximado de $S = 0,035$. Ademais, valores de $S < 0,020$ estão claramente associados às más condições físicas do solo, indicando uma estrutura do solo extremamente degradada.

Andrade et al. (2009) utilizando o índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro, analisou 2.364 amostras abrangendo solos sob cerrado das regiões Centro Oeste, Norte e Nordeste do Brasil e obteve alta correlação com os atributos físicos considerados (como densidade do solo, macroporosidade e porosidade total em diferentes classes texturais) e estabeleceram valores limites para o índice S, para estes solos brasileiros, adequando-o como indicador da qualidade física de solos de cerrado; assim, o valor limite de $S = 0,045$ mostrou-se apropriado para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar degradados, enquanto valores de $S \leq 0,025$ indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) trata-se de um indicador mais complexo, que foi proposto por Silva et al. (1994) nomeado em inglês de “Least limiting water range” e traduzido para o português por Tormena et al. (1998) como IHO. Este indicador teve como base os conceitos discutidos por Letey (1985) o qual, definiu limites em alguns atributos físicos do solo, onde fossem mínimas as limitações ao crescimento e desenvolvimento de plantas, chamado de “Non-limiting water range”. O IHO, portanto, é definido como sendo a faixa de umidade do solo cujos limites são definidos considerando, além da capacidade de campo e ponto de murcha permanente, a resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração do solo, sendo a água uma variável de equilíbrio, amenizando ou agravando os efeitos da aeração e da resistência à penetração. Geralmente, o aumento de D_s resulta em redução do IHO, em direção a valores de D_s em que o IHO pode atingir o valor zero, essa D_s é denominada de densidade crítica do solo (D_{sc}) (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998;

Imhoff et al., 2001). Pode-se considerar que sistemas de manejo que propiciam maior frequência de $D_s < D_{sc}$ oferecem menores restrições físicas ao desenvolvimento das plantas.

Além da D_{sc} ($IHO=0$), pode ser identificada também a densidade do solo de alerta (D_{sa}), que corresponde ao valor de D_s em que os limites de AD do solo passam a ser definidos pela excessiva resistência do solo à penetração (θ_{RP}) e, ou, pela reduzida porosidade de aeração (θ_{PA}), onde o IHO torna-se menor do que a AD (Guimarães et al., 2013). Segundo os autores, sua identificação é importante para a adoção de medidas eficientes de recuperação e, ou, conservação dos solos agrícolas por permitir a antecipação de medidas de controle, evitando-se severas condições restritivas às plantas quando a $D_s > D_{sc}$.

Petean et al. (2010) analisando, através do IHO , a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto, em sistema ILP, sugere que a integração lavoura-pecuária cria um ambiente físico positivo no solo, desde que se mantenha uma carga animal adequada para evitar o sobrepastejo das áreas.

Sendo assim, a hipótese geral é a de que os indicadores de qualidade física do solo (IQFS) irão identificar as mudanças nos atributos físicos do solo impostos pelos manejos estudados, sendo o impacto do sistema $ILP > ILPF$ e a hipótese específica é a de que os dois manejos atingirão a densidade do solo crítica ($IHO=0$) em diferentes densidades do solo, demonstrando o potencial de degradação da qualidade física do solo de cada sistema.

Baseado no exposto, este trabalho teve o objetivo de analisar a qualidade física do solo submetido à Integração Lavoura-Pecuária (ILP) e à Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) avaliando se o componente arbóreo, no ILPF, contribui para a melhoria das propriedades físicas do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado no município de Ponta Grossa-PR localizado no segundo Planalto Paranaense, que apresenta substrato geológico composto por rochas sedimentares. O clima é o Cfb - Clima temperado; temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C sem estação seca definida, a precipitação pluvial total anual entre 1.300 a 1.800 mm, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (Alvares et al., 2013). Os tipos de solos encontrados na área de ILP são classificados como Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico, e na área

de ILPF classificado como Latossolo Vermelho, ambas as áreas possuem classe textural areia franca (IBGE, 2015). O relevo geral é suave ondulado, com declividades variando entre 3 e 13 %; em termos hidrográficos, pertence à bacia do rio Tibagi (IAPAR, 1978), sendo a localização do ILP 595.644 X (m) e 7.220.878 Y (m) (UTM), e do ILPF 595.854 X (m) e 2.221.081 Y (m) (UTM).

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com dois tratamentos e três blocos, totalizando seis unidades experimentais. Os tratamentos foram dois sistemas de uso do solo: Sistema Agropastoril - Integração Lavoura Pecuária (ILP) e Sistema Agrossilvopastoril - Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Cada sistema de produção foi composto por três blocos de tamanho variável, sendo o ILP (0,41, 0,43 e 0,47 ha) e o ILPF (0,51, 0,60 e 0,64 ha), gerando uma área experimental de 3,06 ha, conforme Figura 1.

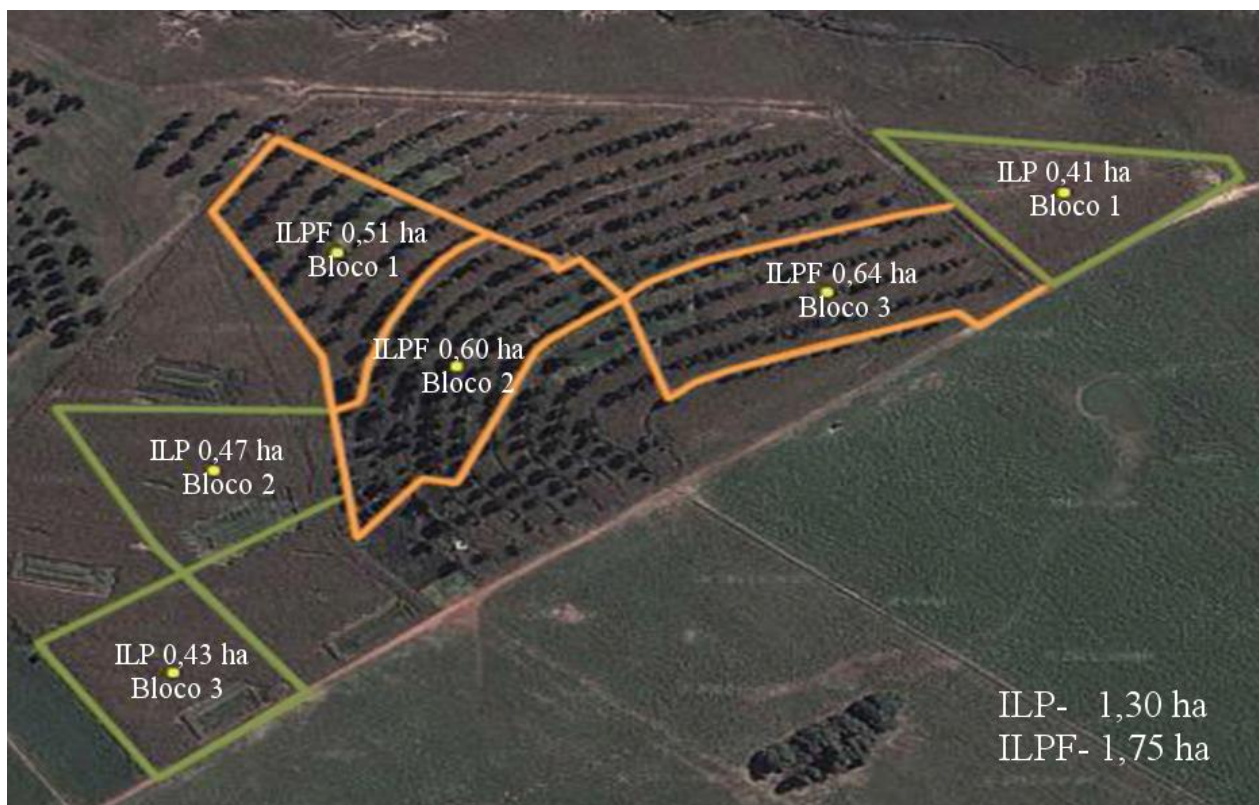


FIGURA 1- Divisão das áreas experimentais na Fazenda Modelo-IAPAR, Ponta Grossa-PR.

As áreas de ILP e ILPF eram utilizadas para pastagens em uso convencional (extensivo) e de pouco valor forrageiro. Em 2006, foram preparadas mediante aração, gradagem e incorporação de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, para o estabelecimento de

sistemas integrados agropastoril (4,8 ha) e agrossilvipastoril (7,5 ha). No sistema agrossilvipastoril foram plantadas mudas de eucalipto (*Eucalyptus dunnii*), aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) e grevilea (*Grevillea robusta*) em linhas simples com espaçamento de 14 m x 3 m, alocadas transversalmente ao sentido predominante da declividade do terreno para controle do escoamento superficial das águas da chuva e para que o deslocamento de máquinas e animais fosse predominantemente transversal ao sentido da declividade. As espécies arbóreas foram dispostas alternadamente na mesma linha de plantio (Silva, 2012). As áreas de produção são manejadas com agroquímicos conforme o manejo das culturas, em Zagatto (2014), pode-se verificar uma relação detalhada com tipo e dose desses produtos (herbicidas, fungicidas e inseticidas).

Desde a sua implantação, os sistemas integrados de produção são cultivados no inverno com aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium multiflorum*) em consórcio e pastejados por novilhas da raça Purunã, nestas áreas, a carga de animais foi ajustada conforme altura da pastagem (mínimo de 0,20 m), tendo em vista que estas áreas são divididas em piquetes. No verão são cultivados milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.), em sistema de rotação bianual (Silva et al., 2015), segundo os autores no ano em que foram realizadas as coletas das amostras, foi plantado soja no verão, dia 15/11/2012, utilizando-se na adubação de plantio 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O sem adubação nitrogenada de plantio e cobertura. A colheita da soja foi realizada dia 17/04/2013 e plantado aveia preta+azevém dia 25/04/2013, utilizando-se na adubação de plantio 16 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O, e na adubação de cobertura 90 kg ha⁻¹ de N no mês de junho.

2.2. AMOSTRAGEM E ANÁLISES DE SOLO

As amostragens foram realizadas em novembro de 2012. Em cada bloco foi aberta uma trincheira para coleta de amostras indeformadas em quatro camadas (0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m). Foram coletadas quatro amostras de solo em cada trincheira e em cada camada, em anéis volumétricos (~69 cm³), gerando um total de 96 amostras (4 camadas x 4 amostras x 3 blocos x 2 tratamentos).

Foram determinados os seguintes atributos físicos do solo:

- a) Densidade do solo (Ds) conforme (Blake e Hartge, 1986).
- b) Porosidade total (α), macro e microporosidade.

A porosidade total foi calculada utilizando a densidade de partículas, por meio da fórmula:

$$\alpha = \left[1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \right]$$

Onde: α = porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); e

D_p = densidade de partículas (Mg m^{-3}).

Nesse estudo a D_p foi obtida em laboratório para cada amostra utilizada. Para a microporosidade, considerou-se o conteúdo volumétrico de água equilibrado a um potencial matricial de -100 hPa, equivalente à 30 μm de diâmetro de poros, onde foi considerado como a máxima retenção de água, sendo a macroporosidade a diferença entre a porosidade total e a microporosidade, considerando os poros maiores que 30 μm de diâmetro.

c) A resistência do solo à penetração de raízes (RP) foi determinada nas amostras indeformadas submetidas a um gradiente de umidade, utilizando um penetrômetro de bancada descrito em Tormena et al. (1998).

d) A curva de retenção de água (CRA) do solo foi determinada através do procedimento descrito em Silva et al. (1994). As amostras foram divididas em dois grupos, contendo seis repetições por camada em cada tratamento. Um grupo foi submetido aos potenciais -20, -60 hPa em mesa de tensão, e -80, -100, -330 e -1000 hPa em câmaras de Richards, o outro grupo foi submetido a -5000 e -15000 hPa, em câmaras de Richards, conforme descrito em Klute (1986).

Nas mesmas profundidades foram coletadas amostras deformadas de solo em todas as unidades experimentais para as seguintes determinações:

e) Textura do solo: (areia, silte e argila) através do método do densímetro de Bouyoucos (Gee e Bauder, 1986).

f) Densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico conforme Klute (1986).

g) O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado por espectrofotometria utilizando um espectrofotômetro colorimétrico modelo Spectrophotometer SP 2000 UV.

2.3. DENSIDADE DO SOLO MÁXIMA ($D_{s_{\text{máx}}}$), E DENSIDADE RELATIVA DO SOLO (DR)

A $D_{s_{\text{máx}}}$ e DR foram determinadas conforme Marcolin e Klein (2011):

$$Ds_{m\acute{a}x} = 2,03133855 - 0,00320878 MO - 0,00076508 Argila \quad (1)$$

Onde: $Ds_{m\acute{a}x}$ = densidade do solo máxima ($Mg\ m^{-3}$);

MO= matéria orgânica do solo ($g\ kg^{-1}$);

Argila= teor de argila no solo ($g\ kg^{-1}$).

$$DR = \frac{Ds}{Ds_{m\acute{a}x}}; 0 \leq DR \leq 1 \quad (2)$$

Onde: DR= densidade relativa do solo (adimensional);

Ds= densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

$Ds_{m\acute{a}x}$ = densidade do solo máxima ($Mg\ m^{-3}$).

2.4. UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}) E CAPACIDADE DE AERAÇÃO (CA)

A umidade volumétrica na capacidade de campo foi determinada conforme abaixo:

$$\theta_{cc} = \theta(\psi - 100\ hPa) \quad (3)$$

Onde: θ_{CC} = conteúdo de água na capacidade de campo ($m^3\ m^{-3}$);

$\theta(\Psi-100\ hPa)$ = conteúdo de água equilibrado a um potencial matricial de -100 hPa ($m^3\ m^{-3}$), (Haise et al., 1955).

A capacidade de aeração do solo (CA) foi determinada conforme Reynolds et al. (2007):

$$CA = \theta_s(\psi = 0) - \theta_{CC}(\psi = -100\ hPa); 0 \leq CA \leq \theta_s \quad (4)$$

Onde: CA = capacidade de aeração do solo ($m^3\ m^{-3}$);

θ_s = conteúdo de água na saturação ($m^3\ m^{-3}$);

θ_{CC} = conteúdo de água na capacidade de campo ($m^3\ m^{-3}$); e

Ψ = potencial matricial do solo (hPa).

2.5. CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA (CCR)

Foi determinada conforme Reynolds et al. (2007):

$$CCR = \left(\frac{\theta_{CC}}{\theta_s} \right) = \left[1 - \left(\frac{CA}{\theta_s} \right) \right]; 0 \leq CCR \leq 1 \quad (5)$$

Onde: CCR= capacidade de campo relativa (adimensional);

θ_{CC} = conteúdo de água na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$);

θ_s = conteúdo de água na saturação ($m^3 m^{-3}$); e

CA = capacidade de aeração do solo ($m^3 m^{-3}$).

2.6. ÍNDICE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL (IEE)

Foi determinado conforme Pieri (1992):

$$IEE = \frac{1,724 CO}{(Silte + Argila)} \times 100; 0 \leq IEE < \infty \quad (6)$$

Onde: IEE= índice de estabilidade estrutural (%)

CO= conteúdo de carbono orgânico no solo (%)

Conteúdo de silte + argila no solo= (%)

2.7. ÁGUA DISPONÍVEL (AD)

Para determinação da água disponível (AD) foi utilizado o intervalo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), ($AD = CC - PMP$), conforme Reynolds et al. (2007), obtidos através da CRA:

$$AD = \theta_{CC}(\psi = -100 hPA) - \theta_{PMP}(\psi = -15000 hPA); 0 \leq AD \leq \theta_{CC} \quad (7)$$

Onde: AD = água disponível ($m^3 m^{-3}$);

θ_{CC} = conteúdo de água na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$);

θ_{PMP} = conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$); e

Ψ = potencial matricial do solo (hPa).

2.8. INTERVALO HIDRÍCO ÓTIMO (IHO)

Para determinar o IHO, foi utilizado as curvas de retenção de água (CRA) e de resistência do solo (CRS).

Os dados da CRA foram ajustados, utilizando um modelo não linear, representado pela equação de van Genuchten (1980), que é dada por:

$$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{[(1 + \alpha \psi)^n]^{(1 - \frac{1}{n})}} \quad (8)$$

Onde: θ = conteúdo de água do solo ($m^3 m^{-3}$) correspondente ao potencial (Ψ);

θ_{res} = conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), definido como o conteúdo de água em que $d\theta/d\Psi = 0$;

θ_{sat} = conteúdo de água na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

Ψ = potencial matricial da água do solo em hPa;

n = parâmetro empírico adimensionais de ajuste; e

α é um parâmetro expresso em hPa^{-1} .

Os valores críticos para o crescimento das culturas associados com o potencial mátrico na capacidade de campo (θ_{CC}) foi o conteúdo de água no potencial de -100 hPa (Haise et al., 1955) e o ponto de murchamento permanente (θ_{PMP}) foi o conteúdo de água no potencial de -15000 hPa (Richards e Weaver, 1944).

A resistência à penetração (RP) é influenciada pela densidade (D_s) e conteúdo de água do solo (θ), de forma que uma relação funcional entre RP, D_s e θ pode ser identificada como curva de resistência do solo (CRS). Assim, os dados de RP foram submetidos à análise de regressão juntamente com a D_s e umidade volumétrica do solo θ para a obtenção da curva de resistência do solo (CRS), conforme Busscher (1990), adotando os procedimentos descritos por Silva et al. (1994), em que a equação foi linearizada.

$$RP = d \cdot \theta^e \cdot D_s^f \quad (9)$$

Parâmetros da regressão linearizada, para conteúdo volumétrico da água do solo ($\theta = \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em função da resistência a penetração do solo (MPa) e da densidade medida ($D_s = \text{Mg m}^{-3}$) foi calculado conforme abaixo a partir da equação (09).

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln D_s \quad (10)$$

Isolando o θ , temos:

$$\theta_{RP} = \left[\frac{RP}{\text{Exp}(d) \cdot D_s^f} \right]^{1/e} \quad (11)$$

Onde: d , e e f são constantes e (RP=2,0 MPa).

O valor crítico para o crescimento das culturas associado à resistência do solo foi o conteúdo de água no solo em que a resistência (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (Taylor et al., 1966).

Porosidade de aeração (α_{ar}) a 10 % como limite mínimo (Grable e Siemer, 1968):

$$\alpha_{ar10\%} = \left[1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) - 0,1 \right] \quad (12)$$

Onde: $\alpha_{ar10\%}$ = porosidade de aeração de no mínimo de 10 % ($m^3 m^{-3}$);

Ds = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); e

Dp = densidade de partículas ($Mg m^{-3}$).

O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados. O limite superior é o menor valor de θ considerado na capacidade de campo ou na porosidade com ar de 10 %, e o limite inferior é o maior valor de θ na resistência de 2,0 MPa ou no ponto de murchamento permanente.

2.9. ÍNDICE S

Foi determinado, com base na CRA, através do ângulo formado pela tangente, no ponto de inflexão da CRA, conforme a equação (Dexter, 2004):

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (13)$$

Utilizando a restrição de Mualem (1986), ($m = 1 - 1/n$), teremos:

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \cdot \left[\frac{2n-1}{n-1} \right]^{\left[\frac{1}{n} - 2 \right]} \quad (14)$$

Onde: S = índice S (adimensional);

n = parâmetro empírico adimensionais de ajuste;

θ_{sat} = conteúdo de água na saturação ($m^3 m^{-3}$); e

θ_{res} = conteúdo de água residual ($m^3 m^{-3}$), definido como o conteúdo de água em que $d\theta/d\Psi = 0$.

2.10. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se técnicas de regressão linear e não-linear por meio do programa estatístico SAS (SAS, 1991). Para a comparação das médias

entre os tratamentos foi utilizado o intervalo de confiança da média ($P < 0,05$). Diferenças significativas entre as médias ocorreram quando não houve sobreposição dos limites superior e inferior do intervalo de confiança (Payton et al., 2000), sendo os tratamentos avaliados dentro de cada camada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas ILP e ILPF obtiveram DR entre 0,78 e 0,87, sendo os maiores valores encontrados na camada de 0,05-0,10 m para ambos sistemas (Tabela 1). Não foram encontradas diferenças significativas entre os sistemas para a CA e α em nenhuma das camadas estudadas (Tabelas 2). Contudo em profundidade observou-se que a camada do solo de 0,05-0,10 m, tem ocorrido os menores valores de CA e α e maior DR. Carter (1990) estudando solos arenosos (600 g kg^{-1} de areia) obteve máximo rendimento de cereais quando a DR se manteve entre 0,77 e 0,84, embora somente 68,6 % ($R^2 = 0,686$) da variação esperada no rendimento pode ser atribuída à compactação relativa. Lipiec et al. (1991), Reinert et al. (2008) e Klein (2006, 2014) propuseram que valores de DR entre 0,80 a 0,90 ocorrem em solos não compactados e que nessa faixa a DR não é restritiva ao crescimento das plantas. Valores entre 0,90 a 0,95 o solo é considerado compactado, ocorrendo restrições com deformações na morfologia das raízes em grau médio e $> 0,95$ o solo é considerado muito compactado, ocorrendo grande engrossamento, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial do sistema radicular (Reinert et al. 2008 e Klein 2014). Neste contexto, ambos sistemas ILP e ILPF e camadas estudadas ficaram dentro da faixa considerada de solos não compactados, com valores de DR $< 0,90$ (Tabela 1).

Apesar da camada de 0,05-0,10 m ter apresentado os menores valores médios de CA e α , em ambos sistemas, a CA encontra-se adequada para o crescimento e desenvolvimento de raízes. A capacidade de aeração ($CA \geq 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) tem sido recomendada como mínima para o desenvolvimento e produção das culturas sem perdas por déficit devido à aeração na zona radicular. No entanto, alguns trabalhos têm indicado que a $CA \geq 0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é ideal para solos arenosos ou franco-argilosos (White, 2006; Reynolds et al., 2007, 2009). Neste estudo apenas o ILPF obteve $CA < 0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,05-0,10 m, sugerindo que a CA não compromete o crescimento radicular, mas possui um detrimento da CA nesta camada.

TABELA 1. Caracterização das áreas de estudo.

ILP			ILPF			ILP			ILPF			ILP			ILPF			ILP			ILPF		
Camadas			Granulometria			Dp* (Mg m ⁻³)			Ds _{Max} * (Mg m ⁻³)			DR* (-)			COT* (g kg ⁻¹)			IEE* (%)					
Argila			Silte			Areia			Argila			Silte			Areia								
m			-----g kg ⁻¹ -----			-----g kg ⁻¹ -----																	
0,00-0,05	151	120	729	139	114	746	2,66	2,60	1,78	1,78	0,83 (±0,06)	0,85 (±0,06)	24,9 (±3,30)	27,2 (±1,70)	15,8	18,5							
0,05-0,10	149	139	712	123	139	738	2,63	2,60	1,79	1,81	0,87 (±0,02)	0,87 (±0,03)	22,7 (±3,04)	23,7 (±0,00)	13,6	15,6							
0,10-0,20	155	118	726	118	135	747	2,60	2,66	1,83	1,85	0,82 (±0,04)	0,85 (±0,05)	15,0 (±2,40)	16,3 (±8,80)	9,5	11,1							
0,20-0,30	135	135	731	121	137	742	2,61	2,66	1,85	1,88	0,80 (±0,05)	0,78 (±0,04)	13,9 (±0,85)	11,1 (±1,60)	8,9	7,4							
0,00-0,30	148	128	725	125	131	743	2,63	2,63	1,81	1,83	0,83 (±0,05)	0,84 (±0,06)	19,1 (±5,50)	19,6 (±7,26)	11,9	13,2							
Intervalo “bom”												0,80 ≤ DR ≤ 0,90			15 ≤ COT ≤ 30			7 < IEE ≤ 9					

Dp*= densidade de partículas; Ds_{Max}*= densidade do solo máxima; DR*= densidade relativa; COT*= carbono orgânico total; IEE*= índice de estabilidade estrutural; valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Intervalo “bom”: DR: 0,80 ≤ DR ≤ 0,90 (Lipiec et al., 1991; Reinert et al., 2008 e Klein, 2006, 2014); COT: 15 ≤ COT ≤ 30 (CQFSRS/SC, 2004) e IEE: 7 < IEE ≤ 9 (Pieri, 1992; Reynolds et al., 2007, 2009).

TABELA 2. Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}), capacidade de aeração (CA), e porosidade total (α) dos sistemas ILP e ILPF.

Sistemas	ILP	ILPF	ILP	ILPF	ILP	ILPF
Camadas (m)	θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)		CA ($m^3 m^{-3}$)		α ($m^3 m^{-3}$)	
0,00-0,05	0,27a ($\pm 0,04$)	0,28a ($\pm 0,02$)	0,17a ($\pm 0,03$)	0,14a ($\pm 0,07$)	0,44a ($\pm 0,05$)	0,42a ($\pm 0,06$)
0,05-0,10	0,27a ($\pm 0,03$)	0,27a ($\pm 0,02$)	0,14a ($\pm 0,05$)	0,12a ($\pm 0,05$)	0,41a ($\pm 0,02$)	0,39a ($\pm 0,03$)
0,10-0,20	0,26a ($\pm 0,02$)	0,27a ($\pm 0,01$)	0,17a ($\pm 0,03$)	0,14a ($\pm 0,05$)	0,42a ($\pm 0,03$)	0,41a ($\pm 0,04$)
0,20-0,30	0,27a ($\pm 0,03$)	0,26a ($\pm 0,03$)	0,16a ($\pm 0,03$)	0,20a ($\pm 0,04$)	0,43a ($\pm 0,02$)	0,46a ($\pm 0,02$)
0,00-0,30	0,27a ($\pm 0,03$)	0,27a ($\pm 0,02$)	0,16a ($\pm 0,03$)	0,15a ($\pm 0,06$)	0,43a ($\pm 0,03$)	0,42a ($\pm 0,05$)
Intervalo “bom”	-		$\geq 0,14$		-	

Médias com letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo intervalo de confiança da média ($P < 0,05$), valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Intervalo “bom”: CA $\geq 0,14$ (White, 2006; Reynolds et al., 2007, 2009).

Em ambos os sistemas a Ds apresentou valores menores que o considerado limite para solos de textura areia franca que é de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 3), valor este associado à alta probabilidade de oferecer riscos de restrição ao crescimento do sistema radicular das plantas (Reichert et al., 2003; Reinert et al., 2008). Reinert et al. (2008) obteve valores médios de Ds de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ em um Argissolo Vermelho de textura arenosa (150, 120 e 730 g kg^{-1} de argila, silte e areia, respectivamente) cultivado no sistema de plantio direto, e pode constatar que o crescimento normal das plantas de cobertura ocorreu até o limite de densidade de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$; entre a faixa de $1,75$ e $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ ocorreu restrição com deformações na morfologia das raízes em grau médio e, acima de $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$, essas deformações ocorreram em grau alto.

Isto indica que a Ds, nos sistemas integrados de produção estudados, provavelmente não comprometa a qualidade física do solo. Estatisticamente, o ILPF apresentou maior Ds que o ILP somente na camada de 0,10-0,20 m, o que talvez seja devido ao maior pisoteio animal em áreas sombreadas, uma vez que o gado tende a descansar sob as árvores no ILPF, e nesta camada o teor de COT começa a se reduzir em profundidade.

TABELA 3. Densidade do solo (Ds), índice S, capacidade de campo relativa (CCR), água disponível (AD) e intervalo hídrico ótimo (IHO) dos sistemas ILP e ILPF.

Sistemas	ILP	ILPF	ILP	ILPF	ILP	ILPF	ILP	ILPF	ILP	ILPF
Camadas (m)	Ds (Mg m^{-3})		Índice S (-)		CCR (-)		AD ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		IHO ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	
0,00-0,05	1,48a	1,52a	0,057b	0,063a	0,62a	0,67a	0,16a	0,13b	0,13a	0,10b
0,05-0,10	1,56a	1,57a	0,052b	0,061a	0,66a	0,70a	0,12b	0,13a	0,10a	0,07b
0,10-0,20	1,49b	1,59a	0,068a	0,062b	0,61a	0,67a	0,11b	0,13a	0,10a	0,07b
0,20-0,30	1,48a	1,46a	0,064b	0,082a	0,63a	0,56a	0,14a	0,10b	0,13a	0,09b
0,00-0,30	1,50a	1,53a	0,060b	0,067a	0,63a	0,65a	0,13a	0,12a	0,12a	0,09b
Intervalo “bom”	Ds $\leq 1,60$		S $\geq 0,045$		0,60 \leq CCR $\leq 0,70$		0,15 \leq AD $\leq 0,20$		-	

Médias com letras minúsculas iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelo intervalo de confiança da média ($P < 0,05$).

Intervalo “bom”: Ds $\leq 1,60$ (Reichert et al., 2003; Reinert et al., 2008), S $\geq 0,045$ (Andrade et al., 2009), CCR: 0,60 \leq CCR $\leq 0,70$ (Doran et al., 1990; Reynolds et al., 2007, 2009), AD: 0,15 \leq AD $\leq 0,20$ (White, 2006; Reynolds et al., 2007, 2009).

Utilizando o índice S para avaliar a qualidade estrutural, ambos os sistemas obtiveram valores acima do considerado como limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural, valor aproximado de S = 0,045, e distante do valor associado às más condições físicas do solo, S < 0,025 (Tabela 3). Neste indicador o ILPF apresentou melhor resultado em comparação ao ILP, com exceção da camada de 0,10-0,20 m, muito provavelmente em consequência da Ds, que foi menor no ILP.

Reynolds et al. (2009) analisaram diferentes indicadores de qualidade física do solo (IQFS), como Ds, COT, CA, IEE, Índice S, CCR e AD, em solo de textura arenosa (900 g kg^{-1} de areia) sob plantio direto na camada de 0,00-0,10 m e obtiveram valores que correspondem aos encontrados na literatura para a textura do solo estudado, com exceção do Índice S. Os autores concluíram que esse IQFS não foi preciso na avaliação de solos arenosos, e sugeriram a utilização dos limites encontrados de forma criteriosa e em conjunto com outros indicadores. Os autores observaram que os valores de Índice S foram semelhantes a solos argilosos bem estruturados e solos sob mata nativa, S=0,070, estando portanto superestimados. Os valores de Índice S nesse estudo também podem ser considerados altos, no entanto, houve redução do Índice S na camada de 0,05-0,10 m nos dois sistemas, seguindo

o mesmo comportamento dos demais indicadores, os quais também foram mais afetados pelo manejo nesta camada.

Na caracterização das áreas dos sistemas foi determinado o índice de estabilidade estrutural (IEE), que gerou valores acima de 7 % (Tabela 1) em todas as camadas separadas e em conjunto, indicando baixo risco de degradação estrutural. Somente na camada de 0,20-0,30 m dos dois sistemas o índice ficou abaixo de 9 %, apontando nas demais camadas, além de baixo risco de degradação, uma estrutura considerada estável de acordo com (Pieri, 1992).

Silva et al. (2015) determinaram o índice de estabilidade de agregados (IEA) no ILP e ILPF na mesma área de estudo, utilizando-se a relação do diâmetro médio ponderado seco (DMPs) e úmido (DMPu), (DMPu/DMPs), e foi constatado valores médios de IEA de 0,74 e 0,72, respectivamente para ILP e ILPF, sendo relativamente maior nas camadas superficiais (0,00-0,05 m) para o ILP, enquanto que em profundidade (0,20-0,30 m) o IEA foi maior no ILPF. Esses resultados contrariam os encontrados no IEE, contudo vale salientar que o IEE leva em consideração o COT, que no ILPF foi relativamente maior em todas as camadas com exceção da de 0,20-0,30 m. O ILPF, considerando as camadas analisadas em conjunto, 0,00-0,30 m, obteve maiores valores no Índice S.

A capacidade de campo relativa (CCR) ficou dentro do intervalo considerado bom, havendo apenas uma camada (0,20-0,30 m) no sistema ILPF em que a $CCR < 60$, (Tabela 3). A AD nos dois sistemas ficou no intervalo considerado “limitante”, $0,10 \leq AD \leq 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para todas as camadas, com exceção da camada de 0,00-0,05 m no ILP. Neste contexto, a camada de 0,20-0,30 m no ILPF apresentou uma provável insuficiência de água no solo, assim como indicado também pela CCR, em que se obteve o menor valor médio. Estes resultados podem ser devido ao menor teor de COT presente nesta camada, e que está abaixo do considerado bom (Tabela 1), uma vez que o COT está intimamente relacionado com a estrutura do solo e a capacidade de adsorver água, principalmente em solos arenosos. Estatisticamente não houve diferença entre os sistemas ILP e ILPF para AD quando considerado um só camada de 0-0,30 m (Tabela 3).

O intervalo hídrico ótimo (IHO) nos sistemas avaliados apresentaram influência negativa linear da resistência à penetração (θ_{RP}) com o aumento da D_s , sendo esse comportamento mais acentuado no ILPF. A influência da RP (θ_{RP}) na camada de 0,00-0,05 m foi a partir da D_s de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ no ILP e $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ no ILPF, na camada de 0,05-0,10 m a partir de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ no ILP e $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ no ILPF, na camada de 0,10-0,20 m a partir de

1,60 Mg m⁻³ no ILP e 1,52 Mg m⁻³ no ILPF, e na camada de 0,20-0,30 m a partir de 1,46 Mg m⁻³ no ILP e 1,48 Mg m⁻³ no ILPF (Figura 2). Nas camadas analisadas em conjunto, 0,00-0,30 m, a influência da RP (θ_{RP}) foi a partir da Ds de 1,45 Mg m⁻³ no ILP e 1,50 Mg m⁻³ no ILPF (Figura 3). Guimarães et al. (2013) estudando um Latossolo Vermelho sob mata nativa de textura franco-arenosa, composto por 170, 40 e 790 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente, encontrou a densidade do solo de alerta (Dsa) de 1,55 Mg m⁻³. No presente estudo, o início da redução do IHO, Dsa, no ILP foi a partir e 1,35 Mg m⁻³ na camada de 0,00-0,05 m, se elevando nas demais camadas, enquanto para o ILPF a Dsa se deu no valor de 1,48 Mg m⁻³ na camada de 0,20-0,30 m também se elevando nas demais camadas. Apesar da Dsa no ILPF ter sido evidenciada em Ds maiores que no ILP, o efeito da RP com o aumento da Ds foi muito mais relevante do que no ILP (Figuras 2 e 3).

Os sistemas não apresentaram influência da porosidade de aeração (θ_{PA}) como fator de restrição, uma vez que os valores de θ_{PA} foram superiores aos de capacidade de campo (θ_{CC}), para a amplitude de valores de Ds obtidos (Figuras 2 e 3). Em horizontes superficiais arenosos, de solos derivados do arenito Caiuá, não se têm encontrado limitações de porosidade de aeração para o desenvolvimento das culturas (Fidalski et al., 2010, 2013).

O IHO na camada de 0,00-0,05 m no ILP variou de 0,16 a 0,11 m³ m⁻³ e no ILPF de 0,13 a 0,06 m³ m⁻³, na camada de 0,05-0,10 m no ILP variou de 0,12 a 0,09 m³ m⁻³ e no ILPF de 0,12 a 0,02 m³ m⁻³, na camada de 0,10-0,20 m no ILP variou de 0,11 a 0,09 m³ m⁻³ e no ILPF de 0,13 a 0,01 m³ m⁻³, e na camada de 0,20-0,30 m no ILP variou de 0,14 a 0,11 m³ m⁻³ e no ILPF de 0,10 a 0,06 m³ m⁻³. Nas camadas analisadas em conjunto, 0,00-0,30 m, o IHO variou de 0,13 a 0,09 a m³ m⁻³ no ILP e 0,12 a 0,01 a m³ m⁻³ no ILPF (Figuras 4 e 5). De forma geral o IHO foi maior no ILP em comparação ao ILPF, onde o ILPF teve reduções mais drásticas em Ds mais elevadas. Este resultado se deve ao grande efeito da RP em reduzir o IHO no ILPF, em detrimento da qualidade física do solo neste sistema. Fidalski (2015) observou valores de IHO similares ao desse estudo em um sistema ILP, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, em um Latossolo Vermelho de textura arenosa: 126 e 132 g kg⁻¹ de argila, respectivamente, ocorrendo as maiores restrições físicas do solo devido à RP (θ_{RP}), não tendo influência da porosidade de aeração (θ_{PA}) como fator de restrição, independentemente do valor de Ds e do tipo de cultivo, o que corrobora com os resultados encontrados.

A variação do IHO em função da Ds (Figuras 4 e 5), demonstrou que nas camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m o ILPF obteve valores de Ds próximos à densidade crítica do solo

(Dsc) (IHO=0). A Dsc indica condições físicas mais restritivas ao desenvolvimento das plantas (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2001), sendo que o aumento da Ds nessas camadas, ultrapassando a Dsc, podem comprometer a qualidade física do solo no sistema ILPF. Dos IQFS estudados, o IHO sendo o único indicador em que avalia a aeração, a água disponível e a resistência à penetração radicular limitantes conjuntamente, torna-se mais consistente em avaliar a qualidade física do solo, devido principalmente à RP ser um atributo muito importante em manejos em que não há revolvimento do solo.

O ILP apresentou melhores valores de IHO quando comparado ao ILPF em todas as camadas analisadas separadas e em conjunto (Tabela 3). O pior desempenho do ILPF pode estar relacionado ao componente floresta, que segundo (Macedo et al., 2013) gera sombreamento de determinadas áreas, podendo diminuir a cobertura do solo nessas áreas, pelo chamado efeito do sombreamento, deixando-o desprotegido. Esse comportamento no sistema ILPF tende a ocorrer, conforme constatado por (Pergher, 2014) nessa área de estudo, em que a massa seca de resíduos presentes na superfície do solo foi maior no ILP em três épocas do ano, quando comparados ao ILPF.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com Silva et al., (2015) que estudaram as perdas de água e solo e a concentração e perdas de nutrientes no escoamento superficial, na mesma área de estudo, e concluíram que as perdas foram maiores em todo o período avaliado no sistema ILPF. A degradação física na camada de 0,05-0,10 m pode ter influenciado as perdas de água e solo e consequente perdas de nutrientes, indicando maiores cuidados no sistema ILPF.

Os sistemas de produção integrada, ILP e ILPF, têm potencial para reduzir o impacto da produção agrícola na qualidade física do solo, evidenciado pelos IQFS que obtiveram valores adequados ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Contudo, a maioria dos IQFS demonstrou que o ILPF apresentou detrimento da qualidade física do solo em comparação com o ILP, principalmente na camada de 0,05-0,10 m.

Segundo Petean et al. (2010), em sistemas integrados de produção, a lotação animal excessiva e/ou altura inadequada de pastejo tem indicado perda da qualidade física do solo, nas camadas superficiais, devido, principalmente, ao pisoteio dos animais e à retirada da cobertura do solo, que gera a degradação das pastagens e consequentemente do solo. Esses autores observaram uma degradação física do solo muita elevada na camada superficial, 0,00-0,075 m, utilizando altura de pastejo de 0,07 m, e baixa degradação das pastagens e do solo

sob pastejo de aveia e azevém, no inverno com a altura de pastejo mantida acima de 0,21 m da superfície do solo. No presente estudo, os sistemas integrados de produção foram cultivados no inverno com aveia preta e azevém em consórcio, e pastejados na altura mínima de 0,20 m, desde a sua implantação, tendo em vista que estas áreas eram divididas em piquetes. Isso pode ter contribuído para manter os sistemas em condições físicas de solo adequadas para as plantas. Conforme Petean et al. (2010) e Fidalski (2015) um dos fatores mais importantes no manejo de sistemas integrados para que não ocorra degradação das pastagens e do solo é a correta altura de pastejo e/ou lotação animal adequada.

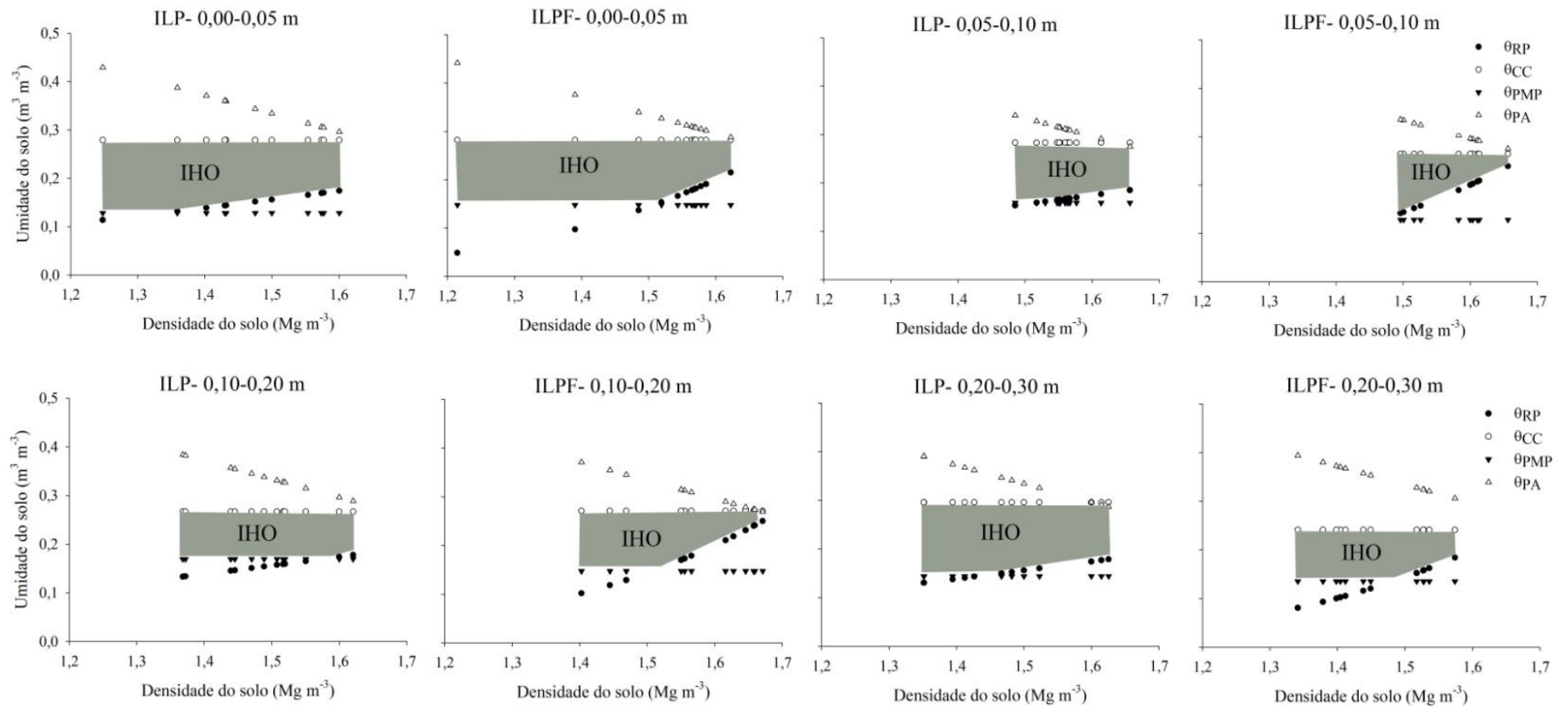


FIGURA 2: Umidade do solo (θ) em função da densidade do solo para o ILP e o ILPF em cada camada do solo, nos valores críticos de capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência à penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

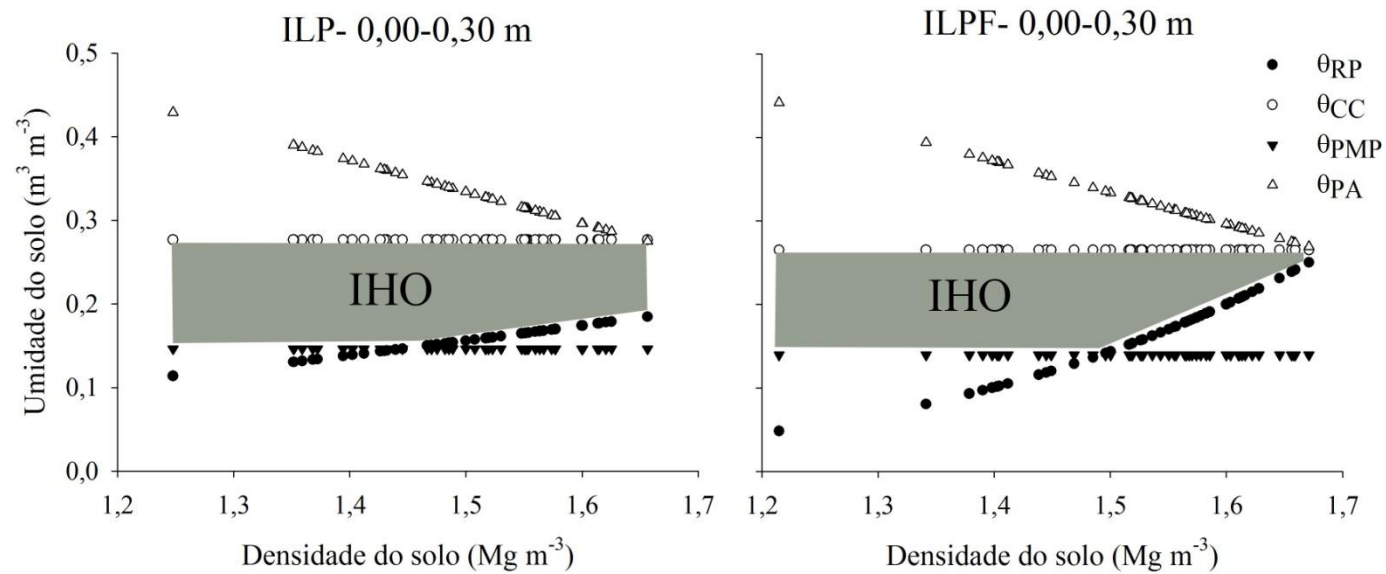


FIGURA 3: Umidade do solo (θ) em função da densidade do solo, nos valores críticos de capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração $0,10 \text{ m}^{-3} \text{m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência à penetração de $2,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) da camada de 0,00-0,30 m dos sistemas ILP e ILPF.

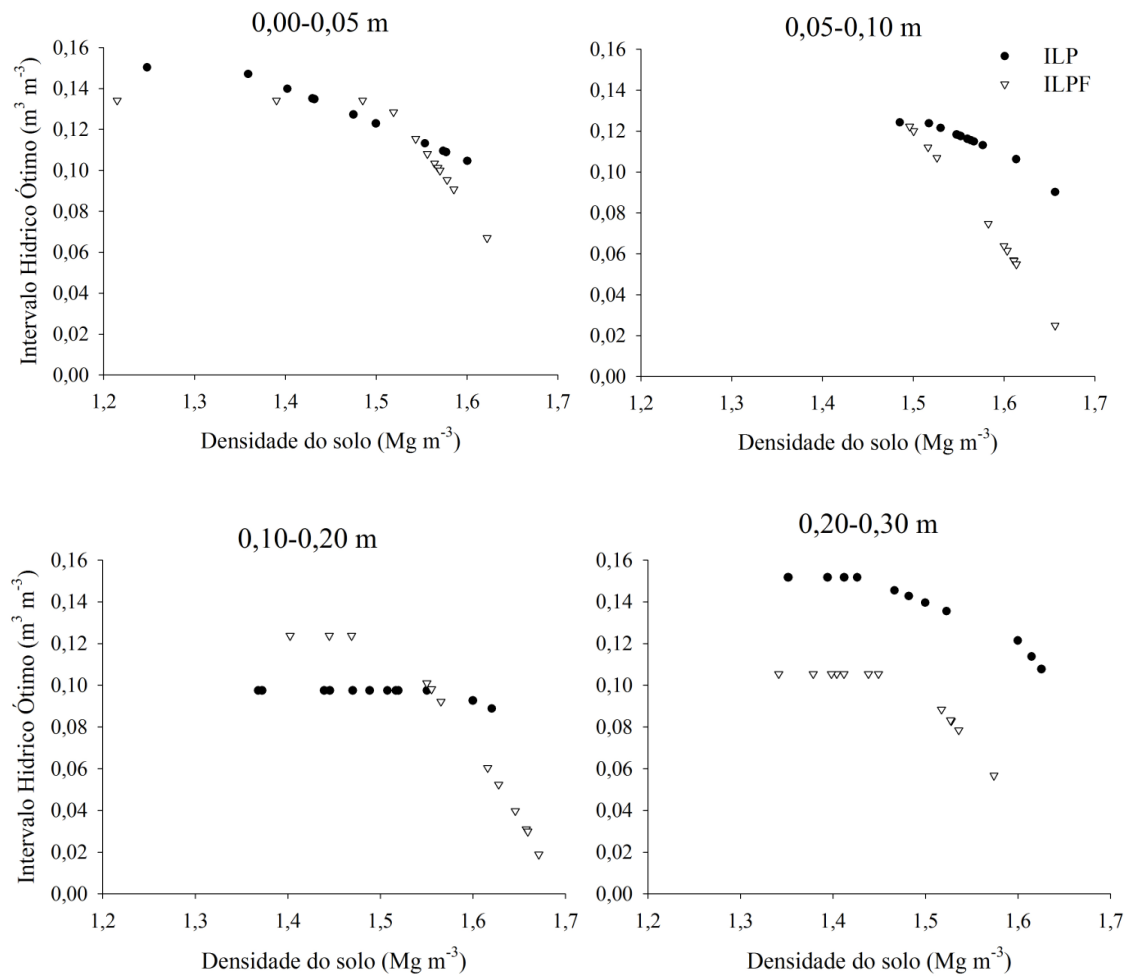


FIGURA 4: Intervalo Hídrico Ótimo em função da densidade do solo para o ILP e o ILPF em cada camada do solo.

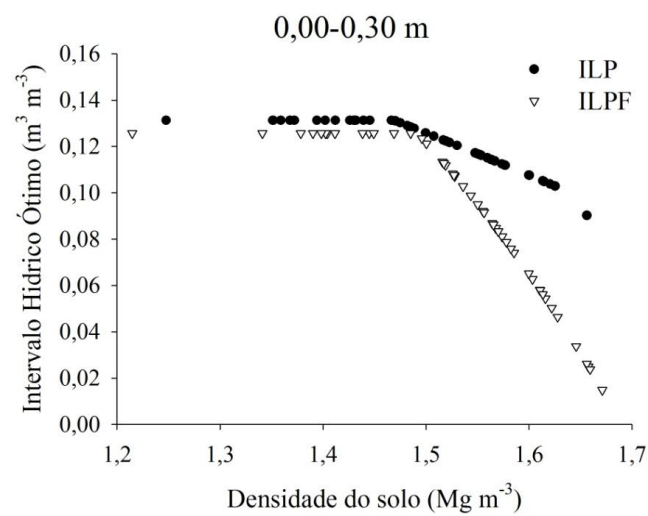


FIGURA 5: Intervalo Hídrico Ótimo em função da densidade do solo da camada de 0,00-0,30 m dos sistemas ILP e ILPF.

4. CONCLUSÕES

Os IQFS foram capazes de distinguir os sistemas integrados de produção, sendo o ILPF o sistema que obteve maior impacto negativo sobre os atributos físicos do solo.

Não foram constatadas as densidades críticas (Dsc) em ambos os sistemas, apesar do ILPF ter apresentado valores de Ds bem próximos do IHO=0.

A qualidade física do solo ficou dentro dos intervalos considerados adequados, na maioria dos indicadores utilizados, para os sistemas integrados ILP e ILPF. Contudo, verificou-se que o componente arbóreo afetou negativamente a qualidade física do solo em comparação ao ILP, principalmente na camada de 0,05-0,10 m.

5. LITERATURA CITADA

Adamoli J, Macedo J, Azevedo JG, Netto, JM. Caracterização da região dos cerrados. In: Solos dos cerrados: tecnologias e estratégia de manejo. EMBRAPA/CPAC, Livraria Nobel, São Paulo; 1986. p.33-74.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Koppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift. 2013;22:711-728.

Andrade RS, Stone LF. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2009;13:382-388.

Arshad MA, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2002;88:153-160.

Balbino LC, Barcelos AO, Stone LF. Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta. Brasília, Embrapa Solos; 2011.

Balbinot Jr AA, Moraes A, Veiga M, Pelissari A, Dieckow J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. Ciência Rural. 2009;39:1925-1933.

Blake GR, Hartge KH. Bulk density. In: Klute A, editor. *Methods of soil analysis: I. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Science Society of America; 1986. p.425-442.

Busscher WJ. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 1990;33:519-524.

Campos LP, Leite LFC, Maciel GA, Brasil EL, Iwata BF. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48:304-312. doi: 10.1590/S0100-204X2013000300009

Carter MR. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine loamy sands. *Canadian Journal of Soil Science*. 1990;70:425-433.

Carvalho R, Goedert WJ, Armando MS. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2004;39:1153-1155.

Cockroft B, Olsson KA. Case study of soil quality in southeastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. In: Gregorich EG, Carter MR, editors. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science*. vol. 25. Elsevier, 1997. p.339-350.

Comissão de fertilidade do solo RS/SC. *Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 3ed. Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004. 401p.

Costa KAP, Oliveira IP, Severiano EC, Sampaio FMT, Carrijo MS, Rodrigues CR. Extração de nutrientes pela fitomassa de cultivares de *Brachiaria brizantha* sob doses de nitrogênio. *Ciência Animal Brasileira*, 2010;11:307-314.

Dexter AR. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 2004;120:201-214. doi:10.1016/j.geodermaa.2003.09.005

Doran JW, Mielke LN, Power JF. Microbial activity as regulated by soil water-filled pore space. Symposium III-3, Ecology of Soil Microorganisms in the Microhabitat Environments III. Transactions of the 14th International Congress of Soil Science. Kyoto, 1990. p.94-99.

Embrapa. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília: recurso eletrônico; 2015.

Fidalski J. Qualidade física de Latossolo Vermelho em sistema de integração lavoura-pecuária após cultivo de soja e pastejo em braquiária. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2015;50:1097-1104.doi: 10.1590/S0100-204X2015001100013

Fidalski J, Tormena CA, Alves SJ. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de *Brachiaria ruziziensis*, em sistema integração lavoura-pecuária. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2013;37:775-783.doi: 10.1590/S0100-06832013000300024.

Fidalski J, Tormena CA, Silva ÁP. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. Scientia Agricola. 2010;67:448-453.doi: 10.1590/S0103-90162010000400012.

Freitas GA, Bendito BPC, Santos ACM, Sousa PA. Diagnóstico ambiental de áreas de pastagens degradadas no município de Gurupi-TO. Biota Amazônia. 2016;6:10-15.doi: <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v6n1p10-15>

Guimarães RML, Tormena CA, Blainski E, Fidalski J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2013;37:1512-1521.

Gee GW, Bauder JW. Particle-size Analysis. In: Klute A, editor. Methods of soil analysis: I. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Science Society of America, 1986. p.383-409.

Grable AR, Siemer EG. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. Soil Science Society of America Proceedings. 1968;32:180-186.

Haise HR, Haas HJ, Jensen LR. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and “minimum point” as related to 15- and 26- atmosphere percentage. Soil Science Society Proceedings. 1955;34:20-25.

IBGE. Manual técnico de pedologia. 3 ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; 2015.

Iapar. Cartas climáticas básicas do estado do Paraná. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná; 1978.

Imhoff S, Silva AP, Dias Júnior MS, Tormena CA. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2001;25:11-18.

Klein V A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. Ciências Agroveterinárias. 2006;5:26-32.

Klein V A. Física do solo. 1 ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo; 2008.

Klein V A. Física do solo. 3 ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo; 2014.

Klute A. Water retention: laboratory methods. In: Black CA, editor. Methods of soil analysis: I. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America; 1986. p.635-662.

Lanzanova ME, Nicoloso RS, Lovato T, Eltz FLF, Amado TJC, Reinert DJ. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2007;31:1131-1140.

Letey J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*. 1985;1:277-294.

Lipiec J, Hakansson I, Tarkiewicz S, Kossowski J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Tillage Research*. 1991;19:307-317.

Macedo MCM, Zimmer AH, Kichel AN, Almeida RG, Araújo AR. Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. In: Encontro de adubação de pastagens da Scot Consultoria - Tec - Fértil, 1; 2013; Ribeirão Preto. Bebedouro: Scot Consultoria; 2013. p.158-181.

Macedo MCM, Zimmer AH. Sistemas pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: Favoretto V, Rodrigues LRA, Reis RA. Editores. Simpósio sobre ecossistemas das pastagens. Anais Jaboticabal: FUNEP: UNESP, Jaboticabal; 1993. p.216-245.

Marcolim CD, Klein VA. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2011;33:349-354.doi:10.4025/actasciagron.v33i2.6120

Marques JDO, Luizão FJ, Teixeira WG, Ferreira SJF. Variações do carbono orgânico dissolvido e de atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de uso da terra na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012;36:611-622.

Mualem Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: Klute A, editor. *Methods of soil analysis: I. Physical and mineralogical methods*, 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy, Monograph; 1986. p.799-823.

Neto JF, Severiano EC, Costa KAP, Junnyor WSG, Gonçalves WG, Andrade R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in croplivestock integration. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2015;37:375-383.

Oliveira TC, Pereira DN, Brito TE, Agostini JAF, Lima PF, Silva AV, Santos CS, Bregagnoli M. Diagnóstico e recuperação de áreas de pastagens degradadas. *Revista Agrogeoambiental*. 2013;1:49-53.

Payton ME, Miller AE, Raun WR. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*. 2000;31:547-551.doi: 10.1080/00103620009370458

Pergher M. Emissão de óxido nitroso e metano do solo e de dejetos bovinos em sistemas integrados de produção com ILP e ILPF [Dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2014.

Petean LP, Tormena CA, Alves SJ. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2010;34:1515-1526.

Pieri CJMG. *Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah*. Berlin, Springer-Verlag; 1992.

Reichert JM, Reinert DJ, Braidia JA. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*. 2003;27:29-48.

Reinert DJ, Albuquerque JA, Reichert JM, Aita C, Andrada MMC. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2008;32:1805-1816.

Reynolds WD, Drury CF, Tan CS, Fox CA, Yang XM. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*. 2009;152:252-263.

Reynolds WD, Drury CF, Yang XM, Tan CS. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*. 2008;146:466-474.

Reynolds WD, Drury CF, Yang XM, Fox CA, Tan CS, Zhang TQ. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil & Tillage Research*. 2007;96:316-330.

Richards LA, Weaver LR. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Science*. 1944;56:331-339.

SAS Institute. SAS/Stat procedure guide for personal computers. 5th ed. Cary; 1991.

Silva AH, Favaretto N, Cavalieri KMV, Dieckow J, Vezzani FM, Parron LM, Cherobim VF, Marioti J, Neto HF. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: Parron LM, Garcia JR, Oliveira EB, Brown GG, Prado RB, editores. *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Brasília: Embrapa, 2015. p.71-83.

Silva AP, Kay BD, Perfect E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America*. 1994;58:1775-1781.

Silva, VP. Produtividade em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no subtropical brasileiro [tese]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.

Taylor HM, Roberson GM, Parker Jr JJ. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*. 1966;102:18-22.

Toma RS, Cooper M, Tavares MF, Carvalho CC, Teato AC. Evolução temporal do comportamento físico-hídrico do solo de um sistema agroflorestal no Vale do Ribeira-SP. *Scientia Forestalis*. 2013;41:237-248.

Tormena CA, Silva AP, Imhoff SDC, Dexter AR. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. *Scientia Agricola*. 2008;65:56-60.

Tormena CA, Silva AP, Gonçalves ACA, Folegatti MV. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 1999;3:286-292.

Tormena CA, Silva AP, Libardi PL. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 1998;22:573-581.

van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980;44:892-898.

White RE. *Principles and Practice of Soil Science*. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing; 2006.

Zagatto MRG. *Fauna edáfica em sistemas de uso do solo no município de Ponta Grossa – PR* [Dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2014.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho faz parte do projeto Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica (ServAmb), realizado pela (Embrapa, 2015), que tem como objetivo a valoração econômica dos serviços ambientais, em diferentes sistemas de uso e manejo do solo, associados à conservação do solo e água, conservação da biodiversidade, sequestro de carbono e produtividade dos sistemas. O objetivo do ServAmb foi fortalecer os estudos de modelagem econômica e ambiental que trata da remuneração destes serviços e assuntos correlatos nos diferentes sistemas de uso da terra.

APÊNDICES

TABELA 1. Parâmetros das variáveis físicas determinadas nas amostras com estrutura indeformadas para a caracterização da curva de resistência do solo (CRS).

Integração Lavoura Pecuária (ILP)					
Variável	Média	Desvio-padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
RP	1,94	1,73	89	0,44	10,50
Ds	1,50	0,09	6	1,25	1,66
θ	0,22	0,09	42	0,08	0,39
Integração Lavoura-Pecuária e Floresta (ILPF)					
RP	2,13	1,59	72	0,10	7,49
Ds	1,53	0,10	6	1,21	1,67
θ	0,21	0,10	47	0,09	0,38

RP = resistência do solo (MPa); θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}); CV = coeficiente de variação (%); n = 96.

TABELA 2. Coeficientes resultantes do ajuste da CRS no solo pelo modelo Busscher (1990), adotando os procedimentos descritos por Silva et al. (1994) dos sistemas ILP e ILPF.

Integração Lavoura Pecuária (ILP)					
Coeficiente	Estimado	Erro-padrão	t	Probabilidade ⁽¹⁾	R ²
d	-2,3212	0,4847	-4,79	< 0,0001	0,60
e	-1,1817	0,1459	-8,10	< 0,0001	
f	2,0193	1,0224	1,98	< 0,0544	
Integração Lavoura-Pecuária e Floresta (ILPF)					
d	-5,3744	0,4495	-11,96	< 0,0001	0,82
e	-1,5086	0,1499	-10,06	< 0,0001	
f	7,7486	0,9247	8,38	< 0,0001	

Probabilidade de significância para os valores estimados dos parâmetros ⁽¹⁾.

TABELA 3. Valores máximos, médios e mínimos de Ds e umidade volumétrica (θ) nos diferentes potenciais utilizados na quantificação da curva de retenção de água (CRA) no solo nos sistemas ILP e ILPF.

Integração Lavoura Pecuária (ILP)						
Ψ cm	Ds			θ		
	Média	Max.	Min.	Média	Max.	Min.
	-----Mg m ⁻³ -----			-----m ³ m ⁻³ -----		
0	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,48 ($\pm 0,03$)	0,55	0,42
20	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,42 ($\pm 0,02$)	0,46	0,35
60	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,33 ($\pm 0,05$)	0,52	0,27
80	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,33 ($\pm 0,02$)	0,38	0,29
100	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,27 ($\pm 0,03$)	0,32	0,23
330	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,21 ($\pm 0,03$)	0,27	0,17
1000	1,51 ($\pm 0,07$)	1,62	1,37	0,19 ($\pm 0,03$)	0,25	0,14
5000	1,50 ($\pm 0,11$)	1,66	1,25	0,16 ($\pm 0,03$)	0,25	0,11
15000	1,50 ($\pm 0,11$)	1,66	1,25	0,14 ($\pm 0,03$)	0,24	0,10
Integração Lavoura-Pecuária e Floresta (ILPF)						
0	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,53 ($\pm 0,03$)	0,57	0,48
20	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,41 ($\pm 0,02$)	0,45	0,38
60	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,31 ($\pm 0,02$)	0,37	0,26
80	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,27 ($\pm 0,03$)	0,37	0,23
100	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,27 ($\pm 0,02$)	0,31	0,23
330	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,21 ($\pm 0,02$)	0,24	0,17
1000	1,52 ($\pm 0,11$)	1,67	1,21	0,17 ($\pm 0,02$)	0,21	0,15
5000	1,55 ($\pm 0,08$)	1,66	1,34	0,15 ($\pm 0,02$)	0,20	0,12
15000	1,55 ($\pm 0,08$)	1,66	1,34	0,13 ($\pm 0,02$)	0,18	0,11

Ψ = potencial matricial da água no solo (hPa); Ds = densidade do solo (Mg m⁻³); θ = conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³); n = 432, valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

TABELA 4. Coeficientes resultantes do ajuste da CRA no solo pelo modelo de Genuchten (1980) nas diferentes camadas do sistema ILP.

Integração Lavoura Pecuária (ILP)					
0,00-0,05 m					
Coeficiente	Estimado	Erro-padrão	Intervalo de Confiança		R ²
α	0,0444	0,0112	0,0218	0,0669	0,94
θ_s	0,4782	0,0112	0,4556	0,5007	
θ_r	0,1032	0,0189	0,0652	0,1412	
n	1,4375	0,0881	1,2607	1,6144	
0,05- 0,10 m					
α	0,0398	0,0103	0,0191	0,0606	0,92
θ_s	0,4595	0,0118	0,4357	0,4832	
θ_r	0,1450	0,0134	0,1180	0,1720	
n	1,5732	0,1224	1,3273	1,8192	
0,10- 0,20 m					
α	0,0483	0,0083	0,0251	0,0593	0,94
θ_s	0,5057	0,0121	0,4714	0,5198	
θ_r	0,1657	0,0097	0,1358	0,1748	
n	1,6874	0,1128	1,4598	1,9130	
0,20-0,30 m					
α	0,0379	0,0108	0,0162	0,0596	0,91
θ_s	0,5013	0,0146	0,4719	0,5307	
θ_r	0,1359	0,0180	0,0907	0,1720	
n	1,5506	0,1302	1,2891	1,8121	

TABELA 5. Coeficientes resultantes do ajuste da CRA no solo pelo modelo de Genuchten (1980) nas diferentes camadas do sistema ILPF.

Integração Lavoura-Pecuária e Floresta (ILPF)				
0,00-0,05 m				
α	0,0696	0,0154	0,03887	0,1005
θ_s	0,5226	0,0107	0,5011	0,5441
θ_r	0,1337	0,0141	0,1055	0,1620
n	1,4854	0,0791	1,3263	1,6445
0,05- 0,10 m				
α	0,0722	0,0117	0,0487	0,0956
θ_s	0,5245	0,0090	0,5065	0,5425
θ_r	0,1153	0,0103	0,0946	0,1361
n	1,4971	0,0579	1,3805	1,6136
0,10- 0,20 m				
α	0,0763	0,0114	0,0533	0,0993
θ_s	0,5289	0,0075	0,5139	0,5439
θ_r	0,1206	0,0097	0,1010	0,1402
n	1,4811	0,0522	1,3761	1,5861
0,20-0,30 m				
α	0,0682	0,0087	0,0507	0,0858
θ_s	0,5476	0,0084	0,5307	0,5645
θ_r	0,1359	0,0069	0,1220	0,1498
n	1,6639	0,0654	1,5325	1,7953

TABELA 6. Coeficientes resultantes do ajuste da CRA no solo pelo modelo de Genuchten (1980) na camada de 0,00-0,30 m dos sistemas ILP e ILPF.

Integração Lavoura Pecuária (ILP)					
Coeficiente	Estimado	Erro-padrão	Intervalo de Confiança		R ²
α	0,0411	0,0054	0,0305	0,0516	0,92
θ_r	0,1366	0,0075	0,1217	0,1514	
θ_s	0,4832	0,0065	0,4704	0,4961	
n	1,5547	0,0587	1,4390	1,6705	
Integração Lavoura-Pecuária e Floresta (ILPF)					
α	0,0724	0,0064	0,0598	0,0851	0,96
θ_r	0,1271	0,0053	0,1166	0,1377	
θ_s	0,5313	0,0048	0,5219	0,5407	
n	1,5253	0,0339	1,4584	1,5921	

